



## بررسی تحرک پذیری نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در خاک

محمود فاضلی سنگانی<sup>۱\*</sup>، علیرضا آستارائی<sup>۲</sup>، امیر فتوت<sup>۳</sup>، حجت امامی<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان و ۲ و ۳- دانشیار و استاد گروه علوم خاک، دانشکده

کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

Email: [mfazeli@guilan.ac.ir](mailto:mfazeli@guilan.ac.ir)\*

### چکیده

نانوذرات آهن صفر ظرفیتی به دلیل واکنش پذیری بالا توانایی تثبیت و حذف آلاینده‌های مختلفی را در خاک دارند. برای استفاده مؤثر از این مواد، آگاهی از تحرک پذیری این ذرات در محیط خاک ضروری است. در این تحقیق تحرک پذیری نانوذرات آهن صفر ظرفیتی بدون پوشش و با پوشش کربوکسی متیل سلولز و ارتباط آن با خصوصیات خاک در ستون‌های دست نخورده خاک در حالت اشباع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اگرچه نانوذرات آهن صفر ظرفیتی بدون پوشش سطحی در خاک تحرک پذیری چندانی ندارند، پوشش کربوکسی متیل سلولز می‌تواند تحرک این ذرات در خاک را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. بررسی ضریب همبستگی بین شاخص‌های تحرک پذیری و خصوصیات خاک نشان داد که اگرچه همبستگی معنی داری بین بسیاری از خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی با تحرک پذیری نانوذرات در خاک وجود دارد، در این بین پارامترهای قدرت یونی و اندازه قطر ذرات خاک و نانوذرات بیشترین همبستگی را با تحرک پذیری نانوذرات آهن در خاک نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: کربوکسی متیل سلولز، پتانسیل زتا، قطر هیدرودینامیک، محیط متخلخل.

### مقدمه

با توسعه فناوری نانو، استفاده از ذرات آهن صفر ظرفیتی در مقیاس نانو با واکنش پذیری بالا و سطح قابل دسترس بیشتر برای واکنش با آلاینده‌ها، برای پاکسازی درجای آلودگی منابع آب زیرزمینی و خاک مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات متعددی کاربرد موفقیت‌آمیز نانوذرات آهن صفر ظرفیتی<sup>۱</sup> (NZVI) در رفع آلاینده‌های مختلف مانند ترکیبات آلی کلردار، آنیون‌های معدنی و فلزات سنگین در محیط‌های آبی، رسوبات و خاک را تأیید کرده است (Zhang, 2003).

علی‌رغم پتانسیل‌هایی که این ذرات در استفاده به عنوان عملگر درجا در رفع آلودگی دارند، انتقال این ذرات به مجاورت آلاینده مورد نظر و توزیع آن‌ها در محیط خاک، رسوبات و آب‌های زیرزمینی به دلیل هم‌آوری ذرات با یکدیگر و همچنین با کلونیدهای خاک همواره با چالش‌هایی مواجه بوده است (Hotze et al., 2010). از این رو مطالعات زیادی برای بررسی انتقال NZVI با پوشش‌های سطحی مختلف در محیط‌های متخلخل مدل و در قالب آزمایش‌های ستونی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Karn and Kuiken, 2009). نتایج حاصل از این تحقیقات نشان داده است که تحرک نانوذرات در محیط متخلخلی مانند خاک تحت تأثیر ویژگی‌های محیط، خصوصیات ذاتی نانوذرات، شیمی سوسپانسیون و خصوصیات هیدرولوژیکی سیستم می‌باشد (Cornelis et. al., 2014).

هرچند نتایج حاصل از بررسی انتقال نانوذرات در چنین سیستم‌های ایده‌آل و تعریف شده برای تعیین مکانیسم‌ها، عوامل کنترل کننده و اثرات متقابل آن‌ها ضروری است، اما تحرک نانوذرات در محیط‌های متخلخل ناهمگن و طبیعی مانند خاک از پیچیدگی بیشتری برخوردار است که مستلزم طراحی و انجام آزمایش‌هایی با شرایط حاکم بر این سیستم‌ها می‌باشد (Cornelis et. al., 2014). در این تحقیق انتقال نانوذرات آهن بدون پوشش<sup>۲</sup> (B-NZVI) و با پوشش کربوکسی متیل سلولز<sup>۳</sup> (CMC-NZVI)، به عنوان یک پوشش پلیمری جهت جلوگیری از هم‌آوری ذرات، در نمونه‌های دست نخورده خاک با

<sup>1</sup> - Nano Zero Valent Iron

<sup>2</sup> - Bare Nano Zero Valent Iron

<sup>3</sup> - Carboxymethyl cellulose



خصوصیات متفاوت شیمیایی فیزیکی و هیدرولوژیکی در شرایط اشباع و در قالب آزمایش‌های ستونی مورد مطالعه قرار گرفت و ارتباط پارامترهای تعیین کننده تحرک پذیری با خصوصیات خاک نیز بررسی شد.

## مواد و روش‌ها

نانوذرات آهن صفر ظرفیتی بدون پوشش و با پوشش کربوکسی متیل سلولز به روش احیا با سدیم بوروهیدرید ( $\text{NaBH}_4$ ) سنتز شد (Cirtiu et al., 2011). به منظور بررسی اندازه اولیه و شکل نانوذرات، تصویر TEM با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترون عبوری مدل LEO 912AB تهیه گردید. ساختار کانی‌شناسی ذرات با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) و درجه خلوص پس از هضم ذرات در اسید هیدروکلریک غلیظ و اندازه‌گیری غلظت آهن با استفاده از دستگاه جذب اتمی تعیین گردید. نقطه بار صفر<sup>۱</sup> (PZC) نیز در سوسپانسیون با غلظت یک گرم نانوذره بر لیتر آب مقطر تعیین شد (Raychoudhury et al., 2012).

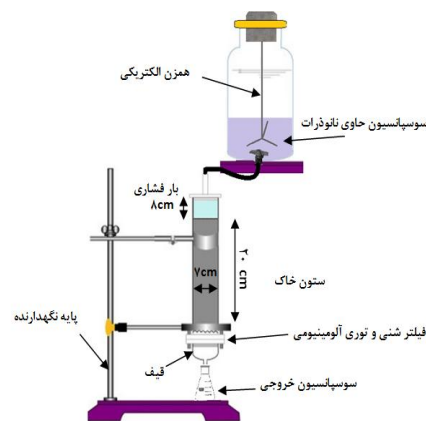
بیست نوع خاک با خصوصیات فیزیکی شیمیایی و مینرالوژیکی متفاوت انتخاب شد و از هر خاک تعداد ۴ نمونه دست نخورده با استفاده از سیلندرهای فلزی استیل به قطر داخلی ۷ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر و یک نمونه دست‌خورده از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متری خاک، نمونه‌برداری شد. نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها بر اساس روش‌های استاندارد تعیین گردید. سپس ستون خاک با صعود موئینه از پایین به بالا به حالت اشباع شده و به وسیله پایه فلزی به حالت عمود ثابت شد. منحنی‌های رخنه (BTC) حاصل از انتقال یون کلراید بر معادله همرفتی-انتشار در نرم افزار STANMOD برازش و پارامترهای هیدرودینامیکی ستون‌های خاک تعیین گردید (Huang et al., 1995).

قطر هیدرودینامیکی نانوذرات<sup>۲</sup> و پتانسیل زتا<sup>۳</sup> در سوسپانسیون نانوذرات در عصاره اشباع استخراج شده از هر خاک با غلظت ۱ گرم نانوذره بر لیتر عصاره با استفاده از دستگاه زتا سایزر (Nano ZS, Malvern) اندازه‌گیری شد (Phenrat et al., 2007). سپس سوسپانسیون تزریقی به ستون با غلظت ۱ گرم بر لیتر در محلول‌های زمینه با غلظت و ترکیب کاتیونی مشابه با عصاره اشباع (با استفاده از نمک‌های کلرید پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم) تهیه و به مدت ۳۰ دقیقه در حمام التراسونیک قرار گرفت. سوسپانسیون‌ها سپس به مخزن تغذیه برای تزریق به ستون‌ها منتقل شده و از طریق لوله‌ها و شیرهای تعبیه شده با شدت جریانی ثابت بطوریکه فشار ثابت ۸ سانتی متر در سر ستون‌ها حفظ گردد در یک پالس ۲ لیتری (معادل جرم ۲۰۰۰ میلی‌گرم) به ستون‌های اشباع تزریق شدند. زه آب خروجی از ستون جمع‌آوری گردید و پس از خشک کردن در دمای ۱۰۵ درجه در آن، رسوب باقی مانده در اسید هیدروکلریک غلیظ حل گردید و با استفاده از اسید نیتریک به حجم رسانیده شد (Moor et al., 2001) و با تعیین غلظت آهن به وسیله دستگاه جذب اتمی، درصد جرمی نانوذره خارج شده از ستون محاسبه گردید. برای تعیین مقدار و توزیع نانوذره باقیمانده در ستون، خاک داخل سیلندر نیز خاک داخل ستون به صورت چهار مقطع ۵ سانتی متری تخلیه در دمای ۱۰۵ درجه خشک و در ترکیب اسید نیتریک، هیدروکلریک و آب اکسیژنه، هضم گردید و غلظت آهن کل خاک تعیین شد (Moor et al., 2001). برای تفکیک آهن زمینه موجود در خاک از آهن باقی مانده در ستون خاک در اثر آزمایش انتقال نانوذرات مقاطع متناظر در ستون شاهد استفاده شد. دو پارامتر درصد نانوذره خارج شده از ستون و واریانس توزیع نانوذرات ( $\sigma_{PR}$ ) در مقاطع ستون خاک که بیانگر توزیع جرم باقی‌مانده در طول ستون است، به عنوان دو شاخص تحرک‌پذیری مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش در سه تکرار برای هر نوع خاک انجام شد. همبستگی بین خصوصیات خاک و نانوذره با پارامترهای تحرک‌پذیری نیز با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون تعیین گردید. شکل ۱ طرح شماتیک آزمایش ستونی را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> - Point of Zero Charge

<sup>2</sup> - Hydrodynamic diameter

<sup>3</sup> - Zeta Potential

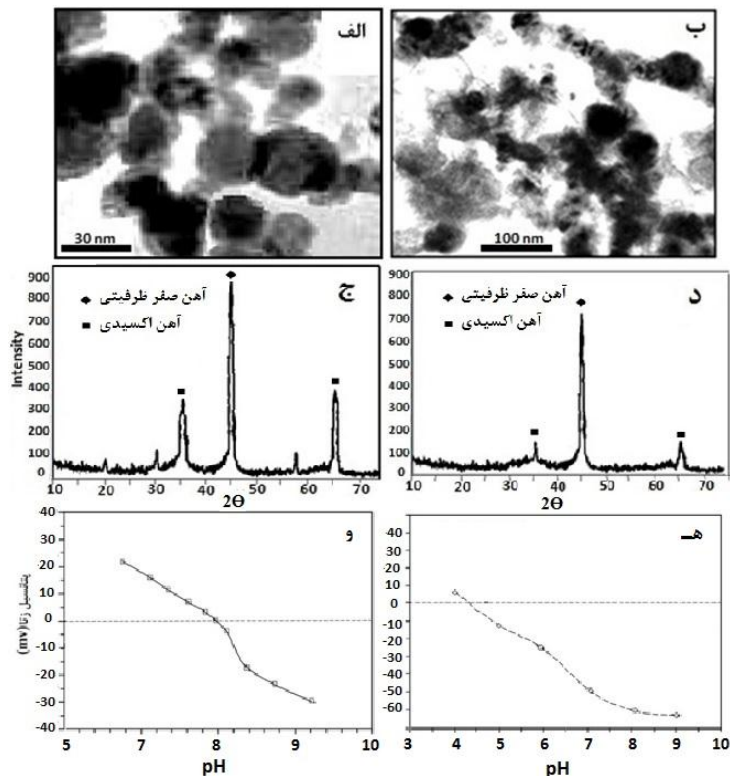


شکل ۱- طرح شماتیک آزمایش انتقال نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در ستون خاک اشباع

### نتایج و بحث

دیفرانسیال‌های حاصل از آنالیز پراش پرتو ایکس برای دو نانوذره مورد بررسی در شکل ۲ ارائه شده است. دیفرانسیال‌های مربوط به ذرات CMC-NZVI بیانگر وجود پیک مربوط به آهن فلزی ( $Fe_0$ ) با شدت بیشتری نسبت به پیک‌های مربوط به دو فرم اکسیدی آهن ( $Fe_2O_3$  و  $Fe_3O_4$ ) است. هر چند در مورد ذرات B-NZVI پیک‌های مربوط به فرم‌های اکسیدی از شدت بیشتری در مقایسه با ذرات CMC-NZVI برخوردارند، که نشان‌دهنده افزایش نسبت فرم اکسیدی به فرم فلزی در این نانوذرات به دلیل اکسایش سطح ذرات در طول پروسه سنتز و تشکیل پوسته اکسیدی بر روی هسته آهن فلزی است. همچنین نتایج حاصل از تعیین درصد خلوص نانوذرات آهن صفر ظرفیتی نشان داد که به ترتیب حدود ۹۳ و ۹۶ درصد جرم نانوذرات سنتز شده CMC-NZVI و B-NZVI را فلز آهن تشکیل می‌دهد. تصاویر به‌دست آمده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) برای دو نوع نانوذره نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. این تصاویر بیانگر این است که نانوذرات مورد بررسی اغلب به شکل کروی بوده و اندازه ذرات منفرد آن‌ها کمتر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. قطر ذرات CMC-NZVI از روی تصویر TEM در دامنه بین ۵ تا ۸۵ و با میانگین  $4 \pm 54$  نانومتر و برای ذرات B-NZVI در دامنه بین ۱۰ تا ۶۰ با میانگین  $3 \pm 35$  نانومتر تعیین گردید. تغییرات مقدار پتانسیل زتا در برابر pH نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق با این شکل نقطه بار صفر برای B-NZVI در pH برابر با ۷/۸ است در حالیکه این مقدار برای CMC-NZVI برابر با ۴/۲ تعیین شد. تفاوت در مقدار  $pH_{PZC}$  برای ذرات آهن صفر ظرفیتی پوشش‌دار و بدون پوشش بر اثر تغییری است که توسط پوشش سطحی در خصوصیات بار سطحی نانوذره ایجاد می‌شود (Saleh et al., 2008).

نتایج حاصل از اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در عصاره اشباع، ماتریکس خاک، خصوصیات هیدرولیکی ستون‌های خاک و همچنین پارامترهای قطر ذره و پتانسیل زتا برای سوسپانسیون نانوذرات در خاک‌های مختلف، در جدول ۱ ارائه شده است. میانگین قطر هیدرودینامیکی B-NZVI و CMC-NZVI به ترتیب  $57.25$  و  $72.3/5$  است که نشان می‌دهد بر اثر تجمع ذرات با یکدیگر، اندازه قطر ذرات در سوسپانسیون چندین برابر ذرات اولیه است. این مقدار برای ذرات B-NZVI بسیار بیشتر از ذرات CMC-NZVI است که نشان‌دهنده پایداری کمتر و تمایل به هم‌آوری بیشتر ذرات B-NZVI در محلول خاک است (Phenrat et al., 2009). مقدار پتانسیل زتا برای ذرات B-NZVI از  $+11/4$  تا  $-15/9$  با توجه به خصوصیات عصاره خاک تغییر می‌کند و میانگین این پارامتر نیز یک مقدار مثبت است که دلیل آن  $pH_{PZC}$  این ذرات است که در بیشتر موارد بیشتر از pH عصاره خاک است. در مقابل برای ذرات CMC-NZVI، پتانسیل زتا در همه خاک‌ها دارای مقدار منفی می‌باشد. ضمن اینکه اندازه مطلق پتانسیل زتا با میانگین  $29/58$  - بزرگتر از ذرات B-NZVI است. پتانسیل زتا در سوسپانسیون شاخصی برای تعیین پایداری سیستم سوسپانسیون است بطوریکه مقادیر بیشتر این پارامتر باعث پایداری بیشتر و پراکنده بودن ذرات از همدیگر می‌شود و برعکس هر چقدر این مقدار به سمت صفر میل کند باعث نزدیکتر شدن و هم‌آوری بیشتر



شکل ۲- تصویر TEM برای B-NZVI (الف) و CMC-NZVI (ب)، دیفرکتوگرام بدست آمده از آنالیز XRD برای B-NZVI (ج) و CMC-NZVI (د) و تغییرات مقدار پتانسیل زتا در برابر pH برای B-NZVI (و) و CMC-NZVI (ه) در سوسپانسیون با غلظت ۱ mg/l.

نانوذرات و در نتیجه افزایش قطر آن‌ها می‌شود. نمونه‌های با پتانسیل زتا بیشتر از قطر هیدرودینامیکی کمتری برخوردار هستند و لذا پایداری آن‌ها در سوسپانسیون بیشتر خواهد بود (Fatisson et al., 2010).

درصد جرمی نانوذره عبور کرده به عنوان یکی از شاخص‌های تحرک‌پذیری نانوذره در خاک، برای نانوذرات B-NZVI دامنه صفر تا ۶/۲ و با میانگین ۱/۳ درصد تغییر می‌کند که نشان دهنده تحرک‌پذیری کم این ذرات در خاک است. این در حالی است که این مقدار برای نانوذره CMC-NZVI در محدوده ۱۰/۲ تا ۶۱/۹ و با میانگین ۲۷/۵ درصد تغییر می‌کند که بیانگر افزایش تحرک‌پذیری این ذرات در خاک بواسطه پوشش CMC است. مقادیر واریانس توزیع نانوذرات باقیمانده در ستون ( $\sigma_{PR}$ ) به عنوان شاخص دیگر بیانگر تحرک نانوذرات نیز نشان می‌دهد که ذرات باقیمانده CMC-NZVI با دارا بودن مقادیر کمتر از توزیع یکنواخت تری در ستون خاک در مقایسه با ذرات B-NZVI برخوردارند. شکل ۳ پروفیل عمقی توزیع درصد نانوذره باقیمانده در ستون برای خاکی است که بیشترین و کمترین مقدار عبور نانوذره را داشته‌اند، را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده در هر دو نوع خاک پروفیل مربوط به ذرات CMC-NZVI تغییرات ملایم‌تری نسبت به B-NZVI دارد و نانوذرات عمدتاً در سطح خاک تجمع پیدا می‌کنند و لذا توزیع آن‌ها در ستون خاک از یکنواختی کمتری برخوردار است.

بررسی ضریب همبستگی بین دو شاخص تحرک‌پذیری و خصوصیات خاک و نانوذره که در جدول ۱ نشان داده شده است بیانگر اثر معنی‌دار خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک و همچنین خصوصیات مربوط به نانوذره بر روی تحرک‌پذیری دو نانوذره مورد بررسی است. در بین پارامترهای مورد بررسی اثر قدرت یونی محلول خاک و قطر هیدرودینامیکی نانوذرات به صورت منفی و میانگین قطر ذرات خاک و اندازه مطلق پتانسیل زتا از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر تحرک‌پذیری نانوذرات آهن در خاک می‌باشند. بررسی مقدار ضرایب همبستگی همچنین نشان می‌دهد که ذرات بدون پوشش بیشتر از اینکه تحت تأثیر خصوصیات خاک قرار گیرند به دلیل هم‌آوری شدید و افزایش اندازه ذرات از تحرک‌پذیری کمتری نسبت به نانوذرات پوشش‌دار برخوردارند.

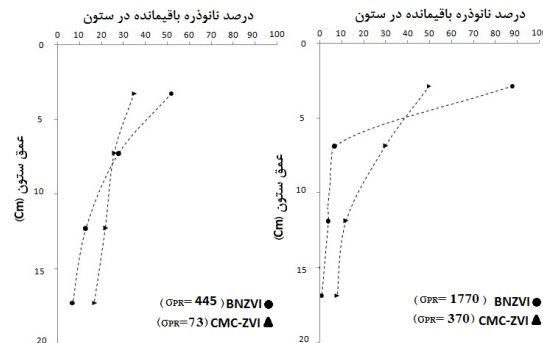
جدول ۱- خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک، درصد نانوذره عبور کرده و واریانس توزیع مقدار باقیمانده در ستون خاک و ضریب همبستگی بین خصوصیات خاک و شاخص های تحرک پذیری نانوذرات

CMC-NZVI		B-NZVI		انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	واحد	متغیر
$\Gamma_{\sigma}$	$\Gamma_T$	$\Gamma_{\sigma}$	$\Gamma_T$						
-۰/۴۱*	۰/۳۷	-۰/۲۹	-	۰/۴۸	۷/۵۹	۸/۶۶	۷	-	اسیدیته
-۰/۵۲**	۰/۴۵*	-۰/۴۱*	-	۹۰۸	۱۳۶۵	۳۸۴۳	۲۱۶	mg/L	کربن آلی محلول
-۰/۷۱**	-۰/۶۹**	-۰/۷۶**	-	۴۶/۲۰	۴۹/۴۶	۱۸۱/۶	۴/۸	mM	قدرت یونی
۰/۳۸*	-۰/۴۱*	۰/۴۴*	-	۲۴/۷۰	۷/۵۹	۴۴۶/۱	۲۴/۶	mg/L	کلسیم محلول
۰/۲۶	-۰/۳۳	-۰/۲۲	-	۱۷/۵۹	۲۱/۷۹	۳۳۶/۸	۱۳/۲	mg/L	منیزیم محلول
۰/۳۳	-۰/۲۸	-۰/۲۱	-	۷۶۴/۷۸	۷۰۳/۴۵	۱۷۲۵	۲۱/۴	mg/L	سدیم محلول
-۰/۲۶	۰/۱۸	-۰/۱۲	-	۶۲/۱۲	۱۱۳/۷۷	۲۳۷/۲	۱۲/۹	mg/L	پتاسیم محلول
۰/۴۷*	-۰/۴۲*	-۰/۲۸	-	۴/۱۸	۶/۶۴	۱۶/۱	۰/۷	-	نسبت جذب سدیم
-۰/۵۳**	۰/۴۷*	-۰/۳۱	-	۱/۰۴	۱/۷	۴/۲	۰/۴	%	ماده آلی
۰/۴۰*	-۰/۲۸	-۰/۲۸	-	۴/۸۸	۱۰/۰۸	۲۲/۶	۳/۸	%	کربنات کلسیم
۰/۳۵	-۰/۱۸	-۰/۱۸	-	۷/۳۲	۱۸/۰۵	۲۹/۴	۶/۷	cmol/kg	ظرفیت تبادل کاتیونی
-۰/۶۶**	۰/۶۲**	-۰/۵۴**	-	۲۱/۰۴	۳۷/۲۵	۷۸/۷	۵/۵	%	شن
-۰/۳۵	۰/۳۲	-۰/۲۸	-	۱۸/۱۴	۳۰/۵	۸۱/۱	۸/۲	%	سیلت
۰/۴۷*	-۰/۴۰*	۰/۴۳*	-	۱۵/۴۸	۲۶/۷۱	۶۰/۸	۳/۷	%	رس
-۰/۳۸	-۰/۴۲*	-۰/۳۱	-	۳/۴۴	۵/۵۸	۱۴/۸	۱/۱	%	سنگریزه (> ۲ mm)
-۰/۶۸**	۰/۷۲**	-۰/۶۴**	-	۱۷۰/۰۴	۱۱۸/۴۱	۶۰۰	۰/۹	$\mu\text{m}$	میانگین قطر ذرات
-۰/۵۹**	۰/۵۲**	-۰/۴۹*	-	۰/۱۱	۲/۸	۲/۹	۲/۵	-	بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات
۰/۳۷	-۰/۳۴	-۰/۲۹	-	۶/۲۰	۱۳/۷	۲۵/۳	۴/۲	$\mu\text{m}$	انحراف معیار هندسی توزیع ذرات
-۰/۴۷*	۰/۴۱*	-۰/۳۷	-	۰/۷۴	۱/۰۷	۲/۳	۰/۱	mm	قطر خاکدانه
-۰/۵۰*	-۰/۴۲*	-۰/۲۶	-	۰/۱۹	۲/۵۷	۲/۸۳	۲/۲۶	-	بعد فرکتال توزیع اندازه خاکدانه
۰/۳۳	-۰/۳۱	-۰/۳۴	-	۰/۱۹	۱/۵۸	۱/۹۱	۱/۲۹	g/cm <sup>3</sup>	چگالی ظاهری
-۰/۴۷*	۰/۴۲*	-۰/۳۲	-	۰/۰۷	۰/۳۷	۰/۵۱	۰/۲۳	-	تخلخل مؤثر
-۰/۶۰**	۰/۵۱**	-۰/۴۱*	-	۰/۰۸۷	۰/۱۵۱	۰/۳۴۳	۰/۰۱۲	cm/min	شدت جریان
۰/۳۸	-۰/۲۹	-۰/۱۴	-	۴۳/۸۹	۱۳/۴	۱۹۲/۳	۰/۰۱	-	عدد پکلت
-۰/۶۳**	۰/۵۸**	-۰/۳۱	-	۶۵/۹۳	۵۹/۸۴	۲۵۰	۰/۲	cm <sup>2</sup> /min	ضریب انتشار هیدرودینامیکی
-۰/۴۲*	۰/۳۷	-۰/۴۱*	-	۰/۴۴	۰/۵۸	۲/۱۸	۰/۰۴	cm/min	سرعت منفذی
۰/۴۱*	-۰/۳۵*	-۰/۲۸	-	۸۸۸/۹۲	۳۵۸/۸۹	۴۰۰۰	۰/۱۰	cm	انتشارپذیری
-	-	۰/۷۶**	-	۷۴۴/۰۶	۲۵۷۳/۵	۷۴۳۰/۱	۵۸۹/۷	nm	میانگین قطر هیدرودینامیکی B-NZVI
-	-	-۰/۵۱**	-	۹/۷۵	+۳/۴	+۱۱/۴	-۱۵/۹	mV	پتانسیل زتا B-NZVI
-	-	-	-	۱/۸۷	۱/۳	۶/۲۰	۰	%	B-NZVI عبور کرده
-	-	۱	-	۳۶۷/۲۰	۱۲۸۰	۱۷۷۰	۴۴۵	-	واریانس توزیع B-NZVI
۰/۵۷**	-۰/۵۰**	-	-	۴۹۰/۰۶	۷۲۳/۵	۲۰۴۵/۳	۱۸۶/۳	nm	میانگین قطر هیدرودینامیکی CMC-NZVI
-۰/۷۱**	۰/۶۲**	-	-	۶/۶۷	-۲۹/۵۸	-۱۸/۲	-۴۳/۲	mV	پتانسیل زتا CMC-NZVI
-۰/۶۳**	۱	-	-	۱۴/۲۹	۲۷/۵۰	۶۱/۹	۱۰/۲	%	CMC-NZVI عبور کرده
۱	-۰/۶۳**	-	-	۷۸/۳۳	۲۱۰	۳۷۰	۷۳	-	واریانس توزیع CMC-NZVI

$\Gamma_T$ : ضریب همبستگی پیرسون بین خصوصیات مورد بررسی و درصد نانوذره عبور کرده از ستون خاک

$\Gamma_{\sigma}$ : ضریب همبستگی پیرسون بین خصوصیات مورد بررسی و واریانس توزیع جرم نانوذره باقیمانده در ستون خاک

\*\* و \* به ترتیب در سطح ۱ درصد و ۵ درصد معنی دار است.



شکل ۳- تغییرات درصد جرمی نانوذره باقیمانده در ستون نسبت به عمق

منابع

- Cirtiu C.M., Raychoudhury T., Ghoshal S., Moores A. 2011. Systematic comparison of the size, surface characteristics and colloidal stability of zero valent iron nanoparticles pre- and post-grafted with common polymers. *Colloids and Surfaces A- Physicochemical and Engineering Aspects* 390:95-104.
- Cornelis G., Hund-Rinke K., Kuhlbusch T., van den Brink N., Nickel C. 2014. Fate and Bioavailability of Engineered Nanoparticles in Soils: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 44:2720-2764.
- Fatissou J., Ghoshal S., Tufenkji N. 2010. Deposition of carboxymethylcellulose-coated zero-valent iron nanoparticles onto silica: roles of solution chemistry and organic molecules. *Langmuir* 26:12832-40.
- Hotze E.M., Phenrat T., Lowry G.V. 2010. Nanoparticle Aggregation: Challenges to Understanding Transport and Reactivity in the Environment. *Journal of Environmental Quality* 39:1909-1924.
- Huang K., Toride N., Van Genuchten M.T. (1995) Experimental investigation of solute transport in large, homogeneous and heterogeneous, saturated soil columns. *Transport in Porous Media* 18:283-302
- Kanel S.R., Choi H. 2007. Transport characteristics of surface-modified nanoscale zero-valent iron in porous media. *Water Science and Technology* 55:157-162.
- Karn B., Kuiken T., Otto M. 2009. Nanotechnology and in Situ Remediation: A Review of the Benefits and Potential Risks. *Environmental Health Perspectives* 117:1823-1831.
- Moor C., Lymberopoulou T., Dietrich V.J. 2001. Determination of Heavy Metals in Soils, Sediments and Geological Materials by ICP-AES and ICP-MS. *Microchimica Acta* 136:123-128.
- Phenrat T., Saleh N., Sirk K., Tilton R.D., Lowry G.V. 2007. Aggregation and sedimentation of aqueous nanoscale zerovalent iron dispersions. *Environmental Science & Technology* 41:284-290.
- Phenrat T., Kim H.J., Fagerlund F., Illangasekare T., Tilton R.D., Lowry G.V. 2009 Particle size distribution, concentration, and magnetic attraction affect transport of polymer-modified Fe(0) nanoparticles in sand columns. *Environ Sci Technol* 43:5079-85.
- Raychoudhury T., Tufenkji N., Ghoshal S. 2012. Aggregation and deposition kinetics of carboxymethyl cellulose-modified zero-valent iron nanoparticles in porous media. *Water Res* 46:1735-44.
- Saleh N., Kim H.J., Phenrat T., Matyjaszewski K., Tilton R.D., Lowry G.V. 2008. Ionic strength and composition affect the mobility of surface-modified Fe-0 nanoparticles in water-saturated sand columns. *Environmental Science & Technology* 42:3349-3355.
- Zhang W. X. 2003. Nanoscale Iron Particles for Environmental Remediation: An Overview. *Journal of Nanoparticle Research* 5:323-332.

## Mobility of Zero Valent Iron Nanoparticles in Soil

M. Fazeli Sangani<sup>1\*</sup>, A. Astaraei<sup>2</sup>, A. Fotovat<sup>3</sup> and H.t Emami<sup>2</sup>

1- Assistant. Professor, Soil Science Department, University of Guilan and 2,3- Associate Professor and Professor., Department of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad

Email: [mfazeli@guilan.ac.ir](mailto:mfazeli@guilan.ac.ir)

### Abstract

Due to highly reactivity, zero valent iron nanoparticles have a great capability for stabilization and removal of different kinds of pollutants associated with soil. For efficient application of these materials, it is crucial to well understand their mobility in soil media. In this study the mobility of bare and carboxymethyl cellulose coated zero valent iron nanoparticles and its correlation with different soil properties was investigated in saturated columns of undisturbed soil. The results showed that although bare zero valent iron nanoparticles are not mobile enough, carboxymethyl cellulose coating can significantly increase their mobility in soil media. Correlation coefficients between mobility indices and soil properties showed that however, there is a significant correlation between most of soil physical, chemical and hydraulic properties of soil and nanoparticles' mobility, but ionic strength, soil particle and nanoparticle diameter are of most significant parameters affecting zero valent iron nanoparticles mobility in soil media.

**Keywords:** Carboxymethyl cellulose, Zeta potential, Hydrodynamic diameter, porous media.